

СУЧАСНІ АВІАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 629.735.03:621.43.031.3(045)

Л.Г. Волянська, канд. техн. наук

І.М. Антонюк

С.М. Ковальчук

Ю.Ю. Терещенко

Д.В. Шарлай

ВПЛИВ В'ЯЗКОСТІ ПОТОКУ НА РЕЖИМИ ЗАПИРАННЯ РЕШІТКИ
ТОНКИХ ПЛАСТИНАерокосмічний інститут НАУ, e-mail: aviacosm@nau.edu.ua*Розглянуто течію в'язкого стислого газу в решітці тонких пластин при великих від'ємних кутах атаки. Визначено рівень впливу пристінного примежового шару на режими запирання компресорних решіток.*

Вступ

Аеродинамічний розрахунок ступенів осьового компресора починають з розрахунку течії повітря в елементарних ступенях, які моделюються решітками аеродинамічних профілів.

З використанням аеродинамічних характеристик компресорних решіток визначають характеристики ступенів осьового компресора й обмеження режимів його роботи.

До основних обмежень режимів роботи ступеня компресора належать обмеження за газодинамічною стійкістю, обумовлені відриванням потоку при великих додатних кутах атаки, та режими запирання ступенів компресора за витратою повітря [1].

Відривні течії широко розповсюджені в природі та практиці, і їх детальний розгляд важливий для інженерних розрахунків. Оскільки виникнення відриву є результатом в'язкої – нев'язкої взаємодії шарів течії, для його передбачення необхідно точно моделювати як в'язкі, так і нев'язкі процеси. При цьому необхідно враховувати, що вони взаємодіють нелінійно.

Розташування точки відриву залежить від стану примежового шару перед зоною взаємодії.

Турбулентний примежовий шар більш стійкий до відриву, оскільки в'язке зсувне напруження, що протидіє градієнту тиску, у турбулентному шарі вище, ніж в ламінарному.

Отже, під час дослідження відривних течій необхідно враховувати та досить точно моделювати стан примежового шару.

Аналіз досліджень і публікацій

На теперішній час виконано низку досліджень визначення параметрів і характеристик компресорних решіток [2–4]. На підставі аналізу результатів цих досліджень отримано залежності, які

дозволяють прогнозувати появу режимів запирання компресорних решіток і ступенів осьового компресора за витратою повітря.

На рис. 1 зображено характеристику компресорних решіток у потоці ідеального газу [4], яка дозволяє оцінювати появу режимів запирання компресорних решіток залежно від відношення площі прохідного перерізу горла до площі нормального перерізу на вході в решітку (F_r / F_1).

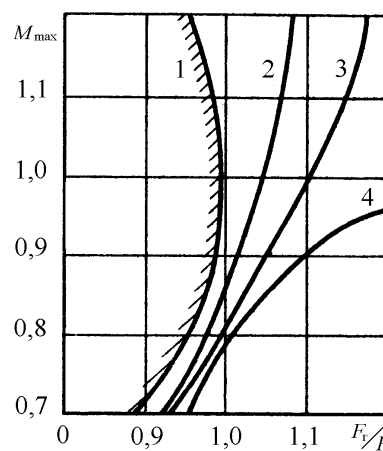


Рис. 1. Залежності значення M_{\max} для решітки аеродинамічних профілів від відношення F_r / F_1 :

1 – теоретична залежність; 2 – надзвукові решітки (експеримент); 3 – трансзвукові решітки (експеримент); 4 – дозвукові решітки (експеримент)

При течії реального газу в компресорній решітці на поверхні профілів формується пристінний примежовий шар. Унаслідок його створення зменшується площа прохідного перерізу горла міжлопаткових каналів, що, у свою чергу, впливає на режим течії та виникнення режимів запирання [5; 6].

Постановка задачі

Урахування впливу стискування і в'язкості потоку передбачає необхідність досить точного визначення розташування й інтенсивності зон відриву, корекції кута установки профілів і густоти решітки, розрахованої для невязкого потоку при різних числах Маха M .

Метою даного дослідження було визначення рівня впливу в'язкості реального потоку на режими запирання в решітці тонких пластин.

Така постановка задачі дозволяє визначити вплив саме в'язкості реального потоку на режими запирання компресорних решіток без урахування особливостей аеродинамічної форми профілів (тілесності).

Геометричні параметри решітки пластин (густота t/b , кути встановлення пластин у решітці γ) відповідають аналогічним параметрам для решіток з аеродинамічних профілів.

Загальна характеристика режимів запирання

На режимах запирання течію повітря в компресорній решітці можна розмежовувати на ділянці конфузornoї (до горла) та дифузornoї (за горлом) течії (рис. 2).

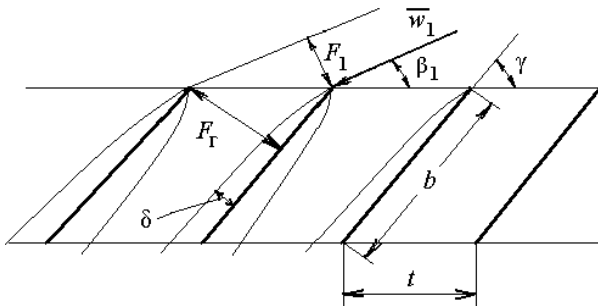


Рис. 2. Схема течії в решітці тонких пластин: w_1 – вектор швидкості на вході в решітку; β_1 – кут входу потоку; γ – кут установки профілів у решітці; δ – товщина примежового шару на поверхні профілю

Якщо течія потоку в горлі міжлопаткових каналів відповідає умові $w_r = a_{кр}$, то виникає режим запирання з максимально можливою витратою повітря.

Аналіз течії в'язкого стислого газу в решітці тонких пластин

Розглянемо течію газу в решітці тонких пластин (рис. 1) для двох випадків: течії невязкого стислого газу і течії в'язкого стислого газу.

Для течії невязкого газу рівняння витрат для перерізів F_1 і F_r запишемо у вигляді

$$mF_1 \frac{P_1^*}{\sqrt{T_1^*}} q(\lambda_1) = mF_r \frac{P_r^*}{\sqrt{T_r^*}} q(\lambda_r),$$

де m – коефіцієнт витрати повітря, що враховує особливості фізичних властивостей робочого тіла:

$$m = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2[k-1]}} \sqrt{\frac{k}{R}},$$

де k – показник адиабати; R – газова стала; F_1 – площа нормального перерізу на вході в решітку; P_1^*, T_1^* – повний тиск і температура в перерізі F_1 ; $q(\lambda_1), q(\lambda_r)$ – відносна густина току в характерних перерізах; F_r – площа горла міжлопаткового каналу; P_r^*, T_r^* – повний тиск і температура в горлі міжлопаткового каналу.

Із умови $P_1^* = P_r^*, T_1^* = T_r^*$ отримуємо:

$$\frac{q(\lambda_a)}{q(\lambda_1)} = \frac{F_1}{F_a} = \frac{t \sin \beta_1}{t \sin \gamma};$$

$$\frac{q(\lambda_r)}{q(\lambda_1)} = \frac{\sin \beta_1}{\sin \gamma};$$

$$q(\lambda_1) = q(\lambda_r) \frac{\sin \gamma}{\sin \beta_1}.$$

Для режиму запирання значення функції витрат в перетині F_1 , яке відповідає режиму критичної течії в горлі F_r , має вигляд

$$q(\lambda_1) = \frac{\sin \gamma}{\sin \beta_1}.$$

Значення $M_{\max} = w_1 / a$, що відповідає виникненню критичної течії в горлі міжлопаткового каналу, визначають за виразом:

$$M_{\max} = \left(\frac{\frac{k+1}{2}}{1 + \frac{k-1}{2} M_{\max}^2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} = \frac{\sin \gamma}{\sin \beta_1}.$$

Для течії в'язкого газу в решітці рівняння нерозривності течії в міжлопатковому каналі з урахуванням примежового шару запишемо у вигляді:

$$mF_1 \frac{P_1^*}{\sqrt{T_1^*}} q(\lambda_1) = m(F_r - \delta^*) \frac{P_r^*}{\sqrt{T_r^*}} q(\lambda_r),$$

де δ^* – товщина витіснення примежового шару в перерізі F_r .

При $P_1^* = P_r^*, T_1^* = T_r^*$ отримуємо:

$$\begin{aligned} \frac{F_1}{(F_a - \delta^*)} &= \frac{q(\lambda_a)}{q(\lambda_1)} \frac{t \sin \beta_1}{(t \sin \gamma - \delta^*)} = \\ &= \frac{q(\lambda_a)}{q(\lambda_1)} \frac{\sin \beta_1}{\left(\sin \gamma - \frac{\delta^*}{t} \right)} = \frac{q(\lambda_a)}{q(\lambda_1)}. \end{aligned}$$

Для режиму запирання при $q(\lambda_r)=1$ отримуємо:

$$q(\lambda_1) = \frac{\left(\sin \gamma - \frac{\delta^*}{t} \right)}{\sin \beta_1}, \quad (1)$$

де $\frac{\delta^*}{t}$ – відносна товщина витіснення примежового шару на поверхні профілю в районі горла; t – шаг решітки: $t = b \frac{t}{b}$; b – хорда профілю; t/b – густота решітки.

Для потоку в'язкого газу режим запирання решітки визначається виразом:

$$M_{\max} = \left(\frac{\frac{k+1}{2}}{1 + \frac{k-1}{2} M_{\max}^2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} = \frac{\sin \gamma - \frac{\delta^*}{t}}{\sin \beta_1}. \quad (2)$$

Для оцінки впливу параметрів примежового шару на режими запирання компресорних решіток використаємо метод визначення інтегральних характеристик турбулентного примежового шару в горлі міжлопаткового каналу, змінюючи його товщину за довжиною профілю залежністю:

$$\delta_r = kx_r \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{Re_r}},$$

де k – коефіцієнт, який характеризує геометричні параметри решітки; x_r – координата перерізу горла міжлопаткового каналу (від носка профілю); $Re_a = \frac{wx_a}{\nu}$ – критерій Рейнольдса для точки з координатою x_r .

Коефіцієнт k визначають за даними експериментальних досліджень. Для решіток із тонких пластинок з густотою $\frac{b}{t} < 1,5$ коефіцієнт $k \approx 0,37$.

Для компресорних решіток точка переходу ламінарного примежового шару в турбулентний розташована біля вхідної кромки лопатки і тому розрахунок примежового шару, як для турбулентного, можна здійснити за всією довжиною хорди лопатки.

Товщину витискування для перерізу в горлі міжлопаткового каналу визначають за формулою

$$\delta_r^* = \delta_r \cdot \frac{1}{n+1},$$

де коефіцієнт $n = 1,43-2,5$.

Для решіток з густотою $b/t = 0,8-1,5$ із слабо зігнутих пластинок з хордою $b = 80-120$ мм, кутами установки $\gamma = 38-45^\circ$, параметрами потоку, що відповідають числам Рейнольдса

$Re = 3-5 \cdot 10^5$, товщина втрат імпульсу $\delta^{**} = 0,3-0,4$ мм.

Виходячи з того, що інтегральні характеристики примежового шару пов'язані між собою співвідношенням:

$$\frac{\delta^*}{\delta^{**}} = \frac{2+n}{n}, \quad (3)$$

отримуємо, що товщина витискування примежового шару в перерізі горла міжлопаткового каналу в решітці з вказаними параметрами, становить:

$$\delta^* = \delta^{**} \frac{2+n}{n}; \quad \delta^* = 0,76-0,92 \text{ мм.}$$

Отримавши значення M_{\max} за формулою (2) з урахуванням товщини витискування примежового шару за формулою (3), можемо оцінити вплив в'язкості газу на запирання ступенів осьового компресора. На рис. 2 показані значення M_{\max} , розраховані для течії невязкого газу в решітці пластин за залежністю

$$M_{\max} = f\left(\frac{F_r}{F_1}\right),$$

з урахуванням впливу примежового шару на потік у міжлопаткових каналах.

На рис. 3 зображено розрахункові залежності значення M_{\max} для течії невязкого газу в решітці пластин без урахування примежового шару та M_{\max}^* з урахуванням впливу примежового шару на потік у міжлопаткових каналах.

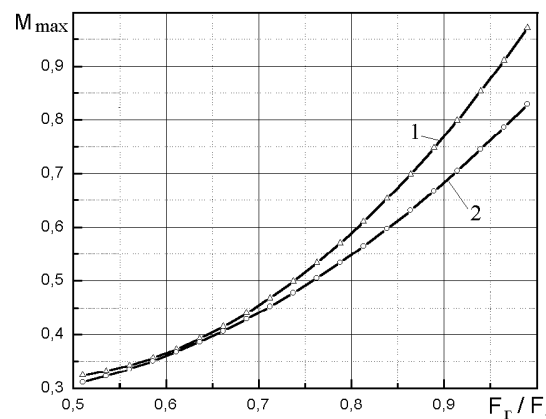


Рис. 3. Залежності значення M_{\max} для решіткі пластин від відношення F_r / F_1 :

1 – M_{\max} ; 2 – M_{\max}^*

Аналіз цих залежностей свідчить про те, що внаслідок впливу в'язкості реального потоку суттєво зменшуються значення швидкості на вході в решітку, при яких трапляється запирання горла міжлопаткового каналу за умови максимальної витрати повітря. Для решітки пластин розбіжність у значеннях M_{\max} та M_{\max}^* становить від 5 до 15%.

Порівняння характеристик режимів запирання для решіток пластин (рис. 3) експериментальних даних для решіток з аеродинамічних профілів (рис. 1) свідчить про достатню коректність запропонованого методу розрахунку.

Визначені за допомогою формул (1), (2) значення M^*_{\max} за якісними ознаками збігаються з результатами експериментальних досліджень, зображених на рис. 1 (криві 3, 4).

Продовження досліджень у цьому напрямі повинно бути спрямоване на визначення розрахункових залежностей для оцінювання впливу в'язкості потоку на характеристики дозвукових і надзвукових решіток тілесних профілів.

Висновки

1. Запропонована методика дозволяє здійснювати оцінку впливу в'язкості потоку на аеродинамічні характеристики решіток пластин під час їх обтікання з великими від'ємними кутами атаки. Порівняння характеристик режимів запирання для решіток пластин (рис. 3) і експериментальних даних для решіток з аеродинамічних профілів (рис. 1) свідчить про достатню коректність запропонованого методу розрахунку.

2. Урахування в'язкості потоку призводить до зменшення розрахункового значення M_{\max} , що відповідає режиму запирання компресорних решіток за витратою повітря. Для решітки пластин

розбіжність у значеннях M_{\max} та M^*_{\max} становить від 5 до 15%.

3. Метою подальшого дослідження є отримання результатів та аналіз впливу особливостей аеродинамічної форми профілів лопаток решіток на режими запирання решіток у потоці в'язкого газу.

Список літератури

1. Терещенко Ю.М., Мітрахович М.М. Авіаційні газотурбінні двигуни. – К.: КВІЦ, 2001. – 312 с.
2. Терещенко Ю.М. Аэродинамика компрессорных решеток. – М.: Машиностроение, 1979. – 120 с.
3. Федоров Р.М. Устойчивость течения воздуха в компрессорах ГТД // Двигатели летательных аппаратов: Тр. объединенных чтений по космонавтике, посвященные памяти выдающихся советских ученых – пионеров освоения космического пространства. – М.: АН СССР, 1980. – С. 61–73.
4. Терещенко Ю.М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров. – М.: Машиностроение, 1987. – 168 с.
5. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. – М.: Машиностроение, 1970. – 603 с.
6. Теорія теплових двигунів / Ю.М. Терещенко, Л.Г. Бойко, С.О. Дмитрієв та ін. – К.: Вища шк., 2001. – 382 с.

Стаття надійшла до редакції 25.11.04.

Л.Г. Волянская, И.М.Антонюк, С.Н. Ковальчук, Ю.Ю. Терещенко, Д.В. Шарлай

Влияние вязкости потока на режимы запирания решетки тонких пластин

Рассмотрено течение вязкого сжимаемого газа в решетке тонких пластин при больших отрицательных углах атаки. Определено влияние пристенного приграничного слоя на режимы запирания компрессорных решеток.

L.G. Volyanskay, I.M. Antonuk, S.N. Kovalchuk, Y.Y. Tereshchenko, D.V. Sharly

Flow influence on a mode of flow choking in the airfoil cascade of the thin plates

Flow of viscous compressible gas is considered in the airfoil cascade of the thin plates with great negative angle of attack. Influence of wall boundary layer upon a mode of flow choking in the airfoil cascade is estimated in the article.